

# АДИТИВНЕ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОШАРОВОГО ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ\*

В.А. Матвійчук, В.М. Нестеренков

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

На базі малогабаритного устаткування для електронно-променевого зварювання СВ-212М створено макет адитивного технологічного обладнання для відтворення процесу виробництва деталей за заданими формою та властивостями методом пошарового наплавлення із застосуванням металевих порошкових матеріалів. Розроблено програмно-апаратну платформу управління устаткуванням, яка була інтегрована до адитивного технологічного обладнання. Платформа складається з апаратного контролера, який розроблений на основі промислового контролера cRIO-9039 виробництва компанії National Instruments (США) та програмного забезпечення для 3D друку. На створеному обладнанні був отриманий дослідний зразок виробу заданої форми з геометричними розмірами: зовнішній діаметр 85 мм, внутрішній 55 мм, висота 35 мм. Для виробництва застосовували порошок титану VT-20 вітчизняної компанії «Ті Текнолоджі». Було проведено металографічні дослідження отриманого зразка. Встановлено, що структура наплавлення у тілі кристалітів в основному має гілчасту  $\alpha'$ -фази і невелику кількість  $\beta$ -фази, що характерно для литого титанового сплаву VT-20. Межі зерен чисті, без включень. Частина зразку безпориста, що свідчить про повне проплавлення шару порошку в процесі 3D друку. Твердість металу на всіх ділянках суттєво не відрізняється і перебуває в межах від  $HV$  3960 до  $HV$  4150 МПа. За результатами досліджень зроблено висновки. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 13.

*Ключові слова:* адитивні технології, електронний промінь, наплавлення, металевий порошок, титановий сплав, управляюча платформа, металографія, дослідження

Інноваційні технології пошарового виготовлення виробів методом швидкого прототипування відкривають нові можливості для виробництва деталей заданої форми і структури із заздалегідь прогнозованими властивостями.

Процес виготовлення виробів таким методом з використанням електронного променя відносно новий, але вже успішно показав великі перспективи свого застосування в промисловості для виробництва широкої номенклатури деталей та вузлів. В його основу покладена операція пошарового сплавлення металевих порошків в вакуумі за допомогою електронного променя. Цей підхід відрізняє швидкий перехід до виробництва тривимірних виробів безпосередньо від системи автоматизованого проектування з можливістю використання широкого спектру металів і сплавів, в тому числі тугоплавких і хімічно активних [1].

Всі існуючі на цей час промислові зразки подібного обладнання належать іноземним компаніям. Вітчизняного устаткування, що виробляється серійно, не існує [2].

Технології та обладнання, які створені колективом Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [3], з самого початку орієнтовані на потреби підприємств України. Для виробництва передбачається застосовувати необхідну виробни-

ку недорогої вітчизняної сировини. Цей підхід надає можливість забезпечити виробництво деталей і вузлів виходячи із потреб споживача і в тісному контакті з ним. Технології, що розробляються, дозволять знизити терміни впровадження у виробництво нових видів продукції, розширити її асортимент, а також створювати принципово нові види продукції із заздалегідь прогнозованими властивостями, виробництво яких неможливо без застосування методів 3D друку [4].

Метою роботи є створення обладнання для адитивного виробництва деталей заданої форми та структури методом пошарового електронно-променевого наплавлення металів у вакуумі із застосуванням порошкових матеріалів.

Для цього необхідно:

- розробити конструкторську документацію основних вузлів адитивного устаткування і виготовити експериментальне лабораторне обладнання;
- розробити програмне забезпечення для проведення досліджень;
- розробити адитивні електронно-променеві технології, а також дослідити властивості багатшарового наплавленого металу;
- створити промисловий макет обладнання в комплекті з програмним забезпеченням.

\*За матеріалами доповіді, представленого на міжнародній конференції «Промислові технології в зварюванні та обробці матеріалів», 9–13 вересня 2019 р. м. Одеса.

Нестеренков В.М. – <http://orcid.org/0000-0002-7973-1986>, Матвійчук В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-9304-6862>

©В.А. Матвійчук, В.М. Нестеренков, 2020

Актуальним завданням є розробка установок на базі електронно-променевої процесів із застосуванням вітчизняних порошкових матеріалів, які будуть сертифіковані і орієнтовані для впровадження на вітчизняних підприємствах [5].

Значна зацікавленість в технологіях, що розроблюються, є у підприємств авіакосмічної промисловості, енергетичного машинобудування, оборонної галузі, а також у підприємств, які виготовляють вироби біомедичного призначення. В останні роки помітною є тенденція впровадження адитивних технологій у провідних вітчизняних компаніях авіакосмічної промисловості і турбінобудування: ДП «КБ «Південне», АТ «Мотор Січ» і ДП НПКГ «Зоря»–«Машпроект» [6].

**Обладнання.** Для вирішення поставлених задач були проведені дослідження з використанням обладнання для 3D друку, яке створено на базі малогабаритного устаткування для електронно-променевого зварювання типу СВ-212М [7]. Обладнання застосовували у складі з імпульсним джерелом живлення 60 кВ/60 кВт та електронно-променевою гарматою ЕЛА-60. Устаткування розроблено в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона.

**Принцип роботи.** Процес електронно-променевого наплавлення відбувається у вакуумній камері 1 (рис. 1). Металевий порошок насипом подається на робочий стіл 9 з бункерів 3. Рейка 4 переміщується уздовж стола 9 та формує на поверхні палети 7 шар порошку заданої товщини. У початковому положенні платформа знаходиться зверху шахти 8. Сфокусований пучок електронів, сформований електронно-променевою гарматою 2, оплавляє поверхню порошку за заданою траєкторією. Таким чином, відповідно до алгоритму, формуються

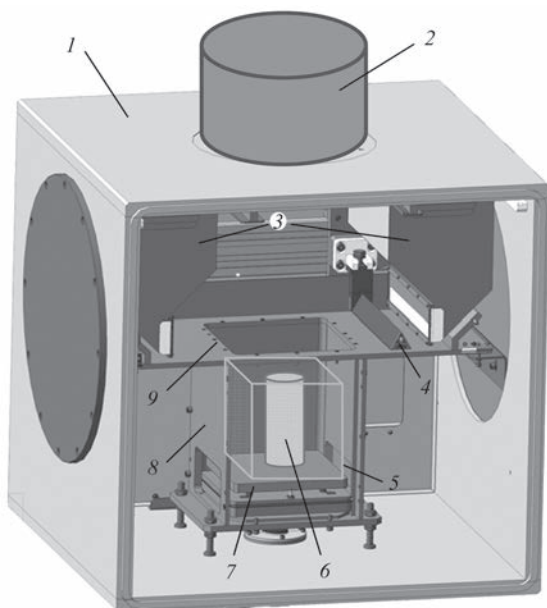


Рис. 1. Схема обладнання для адитивного виробництва із застосуванням металевих порошкових матеріалів (опис 1–9 див. у тексті)

контури виробу і його шар. Далі платформа 7 опускається і накладається наступний шар порошку. Процес повторюється. Виріб б вирощується шар за шаром. В кінці виробничого циклу деталь необхідно витягти з вакуумної камери, очистити від нерозплавленого порошку 5 та механічно обробити [8].

Загальний вигляд лабораторного устаткування для 3D друку наданий на рис. 2.

Обладнання складається із малогабаритної вакуумної камери 1 з механізмами переміщення по вертикалі, а також механізмами подачі і розподілу порошку в горизонтальній площині. До складу устаткування входить електронно-променева гармата 2 та високовольтне джерело живлення 4. Електронно-променева гармата знаходиться зверху вакуумної камери. Вакуумна система забезпечує величину вакууму в камері до  $10^{-4}$  Торр. Елементи системи управління устаткуванням розташовані в шафах 3, де знаходяться промисловий комп'ютер, управляючий контролер, монітор, блоки управління високовольтним джерелом і вакуумною системою. Високовольтне джерело дозволяє отримати регульовану напругу до 60 кВ і струм пучка електронів до 1000 мА [9].

Фото вакуумної камери надано на рис. 3, джерела високої напруги на рис. 4.

**Система управління.** На рис. 5 надана блок-схема системи управління устаткуванням для 3D друку.



Рис. 2. Устаткування для електронно-променевого 3D друку (опис 1–4 див. у тексті)



Рис. 3. Вакуумна камера адитивного устаткування



Рис. 4. Високовольтне джерело з шафою управління

Формування та попередня обробка моделі виробу відбувається в комп'ютері верхнього рівня, який по Ethernet взаємодіє з контролером МСР.

Контролер МСР створений на платформі промислового контролера cRIO-9039 із попередньо встановленими периферійними модулями.

До контролера МСР підключені:

- джерело високої напруги 60 кВ/60кВт;
- електропривід системи переміщень Siemens Sinamics S120;
- підсилювачі розгортки і динамічного фокусування.

МСР формує аналогові сигнали управління розгортками електронного променя за віссю X/Y, сигнали управління фокусуванням – статичним та динамічним і сигнал управління струмом пучка електронів. Сигнали розгортки надходять до підсилювачів потужності, які управляють струмом в відхиляючих котушках електронно-променевої гармати (ЕПГ). Сигнал динамічного фокусування  $I_{fd}$  надходить до підсилювача потужності, який управляє струмом в котушці динамічного фокусування ЕПГ. МСР також формує аналогові сигнали управління струмом пучка електронів  $I_w$  та струмом статичного фокусування  $I_f$ . Ці сигнали формують швидкодіючі модулі аналогових виводів NI-9263. Сигнали надходять до перетворювача Normalizer, який розташований у крейті високовольтного джерела. Перетворювач конвертує аналогові сигнали в цифровий код згідно з протоколом шини CAN.

МСР управляє приводами 3D принтера: приводом механізму переміщення платформи за вертикаллю і механізмом розподілу металевого порошку в горизонтальній площині. Управляючий сигнал з МСР по шині Profibus подається на частотні перетворювачі Siemens Sinamics S120, які

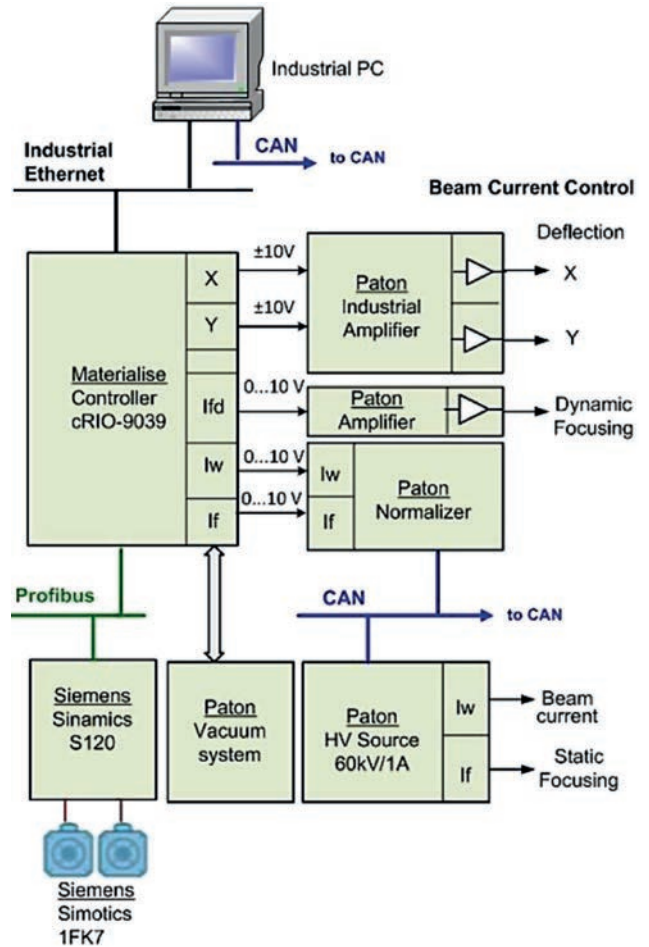


Рис. 5. Блок-схема управління устаткуванням

управляють електродвигунами Siemens Simotics 1FK7 системи переміщень.

МСР через мережу Ethernet взаємодіє з промисловим комп'ютером, який працює під управлінням операційної системи Windows 10. Комп'ютер по шині CAN управляє джерелом високої напруги 3D принтера.

**Програмно-апаратна платформа.** З метою управління обладнанням і реалізації процесів адитивного виробництва розроблена програмно-апаратна платформа, яка складається з управляючого контролера – апаратна частина, і пакета прикладного програмного забезпечення.

Апаратна частина:

- МСР – управляючий контролер.

Програмне забезпечення:

- Magics – програма для редагування файлів моделі виробу;
- BuildProcessor – програма для геометричної побудови деталі на платформі;
- Operator interface – людино-машинний інтерфейс;
- Toolbox – інструмент для налаштування управляючого контролера.

Структура управляючої платформи та стан взаємодій між її компонентами надано на рис. 6.

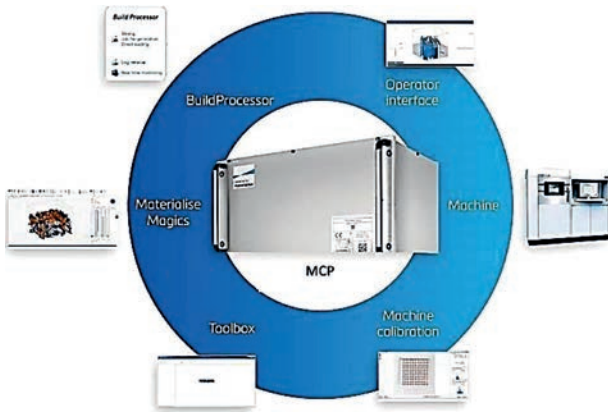


Рис. 6. Структура управляючої платформи



Рис. 7. Інтерфейс контролера MCP.

Функція калібрування обладнання Machine calibration реалізована в програмі Toolbox.

Контролер MCP необхідний для управління адитивним технологічним обладнанням. Контролер розроблений фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона спільно з компанією Materialise (Бельгія) на платформі промислового контролера cRIO-9039 виробництва National Instruments (США) (рис. 7).

Контролер укомплектований периферійними модулями (таблиця).

**Програмне забезпечення.** Взаємозв'язок між структурними елементами управляючої платформи надано на рис. 8.

3D моделі виробу створювали та редагували із застосуванням програми Magics. Також для цих

**Периферійні модулі контролера MCP**

Тип	Найменування
CS-PBMC	Модуль шини Profibus
NI-9263	4-канальний модуль аналогових виходів, ± 10 В
NI-9401	8-канальний модуль швидких TTL виходів
NI-9425	32-канальний модуль дискретних входів, 24 VDC
NI-9477	32-канальний модуль дискретних виходів
NI-9205	32-канальний модуль аналогових входів, ± 10 В



Рис. 8. Взаємозв'язок між структурними елементами управляючої платформи

цілей можливе використання будь-якого іншого програмного забезпечення типу CAD, наприклад, програми NX компанії Siemens.

На рис. 9 надано інтерфейс програми Magics, де розташована модель виробу – лопатка ротора газотурбінного двигуна та сформовані технологічні підтримки, які в процесі друку дозволяють підтримувати форму деталі і знизити тепловий контакт з платформою.

Комп'ютерна модель виробу, яка підготовлена до друку, далі обробляється програмою BuildProcessor. Ця програма дозволяє створити збірки різних деталей на платформі обладнання, розкласти моделі на шари, задати параметри і структуру формування кожного із шарів, встановити потужність електронного променя, швидкість його переміщення та діаметр пучка

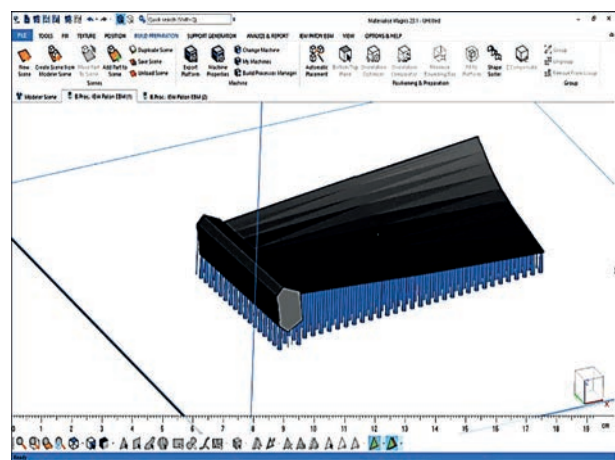


Рис. 9. Інтерфейс програми Magics

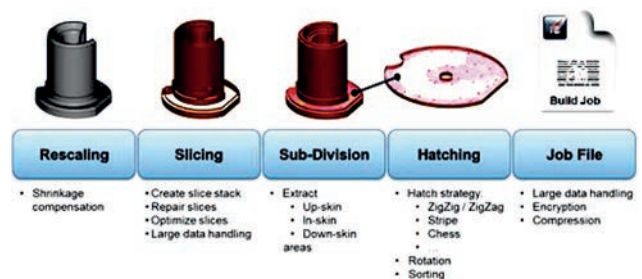


Рис. 10. Функції програми BuildProcessor

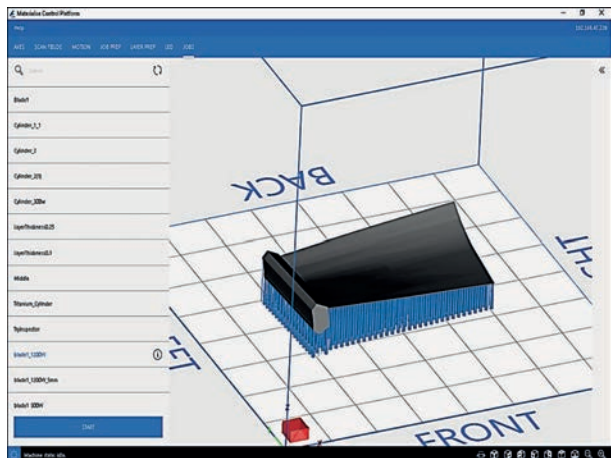


Рис. 11. Програма Operator interface

електронів. Програма надає можливість вибрати матеріал виробу та варіанти текстури для заповнення шарів під час друку.

BuildProcessor формує виконавчий job-file, який надходить до контролера MCP. Використовуючи job-file, MCP управляє процесом 3D друку.

Функції BuildProcessor та послідовність технологічних операцій надані на рис. 10.

Процес 3D друку управляється за допомогою програми Operator interface. У цій програмі задаються технологічні параметри обладнання, а також в режимі реального часу контролюється і відображається процес друку. Програма надає можливість вибрати файл моделі виробу, визначити час початку і кінця виробничого процесу та його стадію. Програма має тривимірну візуалізацію друку. Зовнішній вигляд інтерфейсу програми Operator interface наданий на рис. 11.

Налаштування управляючого контролера та калібрування 3D принтера виконується із застосуванням програми Toolbox.

Програма PLC була створена для управління високовольтним джерелом. Ця програма дозволяє кон-

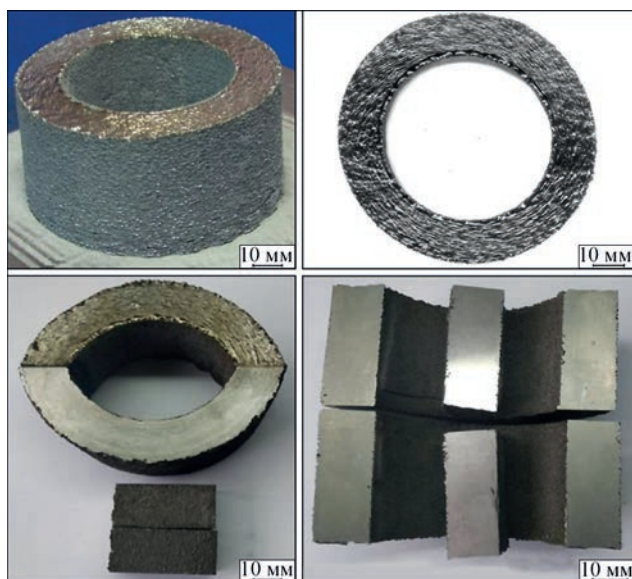


Рис. 12. Зразок виробу

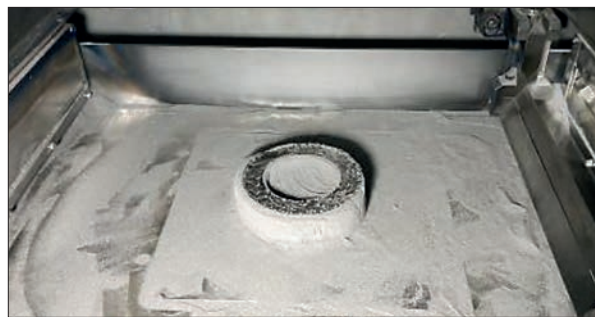


Рис. 13. Зразок надрукованого виробу

тролювати напругу високовольтного джерела, струм електронного променя, струм і напругу бомбардування катода, струм фокусування, а також управляти цими параметрами. Програма має функцію моніторингу і запису поточного стану високовольтного джерела у часі.

**Зразки виробів.** На створеному обладнанні був отриманий дослідний зразок виробу заданої форми (рис. 12) з геометричними розмірами: зовнішній діаметр – 85 мм, внутрішній – 55 мм, висота – 35 мм. Фото надрукованого виробу, який знаходиться на платформі у вакуумній камері устаткування, надано на рис. 13.

Деталі виготовляли із порошка титану VT-20 виробництва вітчизняної компанії «Ті Текнолоджі». Порошок є сплавом системи Ti–Mo–Al–V–Zr з гранулами несферичної форми і литою мікроструктурою частинок. Вибір сплаву даної системи легування обумовлений тим, що він характеризується відмінними антикорозійними, жаростійкими і механічними властивостями. Сплав VT-20 використовується для виготовлення деталей авіаційного призначення, які здатні тривалий час працювати при температурі до 500 °С [5].

Отриманий зразок був підготовлений для подальших металографічних досліджень щодо особливостей формування структури виробу уздовж і поперек осі наплавлення [10].

Проведені випробування показали, що структура наплавлення у тілі кристалів в основному має гілчасту  $\alpha'$ -фазу (пересичений твердий розчин заміщення легуючих елементів в  $\alpha$ -титані) і невелику кількість  $\beta$ -фази. Це характерно для литого титанового сплаву VT-20. Межі зерен чисті, без включень.

Отримані частини зразка безпористі, що свідчить про повне проплавлення шару порошка в процесі 3D друку.

Твердість металу на всіх ділянках суттєво не відрізнялася і перебувала в межах від HV 3960 до HV 4150 МПа.

**Висновки**

В результаті проведених науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт було створено:  
– адитивне лабораторне електронно-променево устаткування;

- програмно-апаратна платформа управління адитивним обладнанням;
- елементи адитивної електронно-променевої технології виробництва металевих деталей пошаровим методом з використанням порошкових матеріалів;
- виробу заданої форми та з прогнозованими властивостями, які виготовлені за адитивною технологією.

### Список літератури

1. В.М. Нестеренков, В.А. Матвейчук, М.О. Русыник (2018) Получение промышленных изделий с применением электронно-лучевых технологий для 3D печати. *Автоматическая сварка*, **1**, 34-39
2. Матвейчук В.А., Нестеренков В.М., Русыник М.О. (2019) Специализированное технологическое электронно-лучевое оборудование для реализации аддитивного процесса послойного изготовления изделий из металла с применением порошковых материалов. *Сб. тр. IX Международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» ВТММР г. Одесса 9–13 сентября 2019 г.*, сс. 84–88.
3. Патон Б.Е., Назаренко О.К., Нестеренков В.М. и др. (2004) Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатным перемещением пушки и изделия. *Автоматическая сварка*, **5**, 3–7.
4. Нестеренков В.М., Матвейчук В.А., Русыник М.О., Овчинников А.В. (2017) Применение аддитивных электронно-лучевых технологий для изготовления деталей из порошков титанового сплава. *Там же*, **3**, 5–10.
5. Нестеренков В.М., Матвейчук В.А., Русыник М.О. и др. (2019) Микроструктура сплавов титана VT20, полученных методом послойной электронно-лучевой наплавки с применением отечественных порошковых материалов. *Там же*, **9**, 7–13.
6. Жуков В.В., Григоренко Г.М., Шаповалов В.А. (2016) Аддитивное производство металлических изделий (Обзор). *Там же*, **5-6**, 148–153.
7. Нестеренков В.М., Матвейчук В.А., Русыник М.О. (2017) Принципы получения промышленных изделий методом быстрого прототипирования с применением электронно-лучевых технологий. *Сб. тр. VIII Международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» ВТММР г. Одесса 11–15 сентября 2017 г.*, сс. 73–77.
8. Matviichuk V.A., Nesterenkov V.M., Rusynik M.O. (2018) Application of additive electron-beam technologies for manufacture of metal products. *Electrotechnica & Electronica E+E*, **3-4**, 69–73.

9. Нестеренков В.М., Хрипко К.С., Орса Ю.В., Матвейчук В.А. (2018) Электронно-лучевые технологии в авиастроении. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. У 2-х т. Т. 2. Київ, Академперіодика, сс. 192–221.
10. Mahale, T.R. (2009) *Electron beam melting of advanced materials and structures*. In: *Syn. of Thesis for the Degree of Dr. of Philosophy*. North Carolina State University, USA.

### References

1. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O. (2018) Manufacture of industrial products using electron beam technologies for 3D-printing. *The Paton Welding J.*, **1**, 24-28.
2. Matviichuk, V.A., Nesterenkov, V.M., Rusynik, M.O. (2019) Specialized technological electron beam equipment for realization of additive process of layer-by-layer manufacture of metal products using the powder materials. In: *Proc. of 9th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Materials Processing - BTWMP (Odessa, 9-13 September 2019)*, 84-88.
3. Paton, B.E., Nazarenko, O.K., Nesterenkov, V.M. et al. (2004) Computer control of electron beam welding with multi-coordinate displacements of the gun and workpiece. *The Paton Welding J.*, **5**, 2-5.
4. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O., Ovchinnikov, A.V. (2017) Application of additive electron beam technologies for manufacture of parts of VT1-0 titanium alloy powders. *Ibid.*, **3**, 2-6.
5. Nesterenkov, V.M., Matviichuk, V.A., Rusynik, M.O. et al. (2019) Microstructure of VT20 titanium alloys produced by the method of layer-by-layer electron beam fusion using domestic powder materials. *Ibid.*, **9**, 2-7.
6. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *Ibid.*, **5-6**, 137-142.
7. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O. et al. (2017) Principles of manufacture of commercial parts by method of rapid prototyping using the electron beam technologies. In: *Proc. of 9th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Materials Processing - BTWMP (Odessa, 9-13 September 2019)*, 73-77.
8. Matviichuk, V.A., Nesterenkov, V.M., Rusynik, M.O. (2018) Application of additive electron-beam technologies for manufacture of metal products. *Electrotechnica & Electronica E+E*, **3-4**, 69-73.
9. Nesterenkov, V.M., Khripko, K.S., Orsa, Yu.V., Matviichuk, V.A. (2018) *Electron beam technologies in aircraft construction*. In: *Science of materials: Achievements and perspectives*. In: 2 Vol., Vol. 2. Kyiv, Akadempriodika [in Russian].
10. Mahale, T.R. (2009) *Electron beam melting of advanced materials and structures*. In: *Syn. of Thesis for the Degree of Dr. of Philosophy*. North Carolina State University, USA.

## ADDITIVE ELECTRON BEAM EQUIPMENT FOR LAYER-BY-LAYER MANUFACTURE OF METAL PRODUCTS FROM POWDER MATERIALS

V.A. Matviychuk, V.M. Nesterenkov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11, Kazimir Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

On the basis of small-sized equipment SV-212M for electron beam welding, a mock-up of additive technological equipment was created to reproduce the process of manufacturing parts according to set shape and properties, applying the method of layer-by-layer surfacing with the use of metal powder materials. A hardware and software platform for the control of equipment was developed, which was integrated into additive technological equipment. The platform consists of hardware controller, which was developed on the basis of the industrial controller cRIO-9039 produced by the company National Instruments (USA) and software for 3D printing. On the created equipment, a test specimen of the product of a set shape with the following geometric dimensions: outer diameter – 85 mm, inner diameter – 55 mm, height – 35 mm was produced. For manufacturing, the powder of VT-20 titanium of the domestic company «Ti-Technology» was used. Metallographic examinations of the specimen were carried out. It was established that the surfacing structure in the body of crystallites mainly has a branchy  $\alpha'$ -phase and a small amount of  $\beta$ -phase, which is characteristic of cast titanium alloy VT-20. The grain boundaries are pure, without inclusions. Parts of the specimen are without pores, which evidences about a complete penetration of the powder layer in the process of 3D printing. The hardness of the metal in all the areas is not significantly different and is in the range from HV 3960 to HV 4150 MPa. According to the results of investigations the conclusions were made. 10 Ref., 1 Tabl., 13 Fig.

*Keywords: additive technologies, electron beam, surfacing, metal powder, titanium alloy, control platform, metallography, investigations*

Надійшла до редакції 08.01.2020